基于时间频率数据平台的数据分析研究

章宇 [1,2]，屈俐俐 [1,2]，董绍武 [1,2,4]，张继海 [1,2]，白杉杉 [1,2]，王一桁 [1,2,3]

(1. 中国科学院国家授时中心，陕西 西安 710600；2.中国科学院时间频率基准重点实验室，陕西 西安 710600；3.中国科学院大学，北京 100049；4.中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049)

摘 要：时间频率数据资源是国家重要的信息资源，时间频率数据平台设计依托国家授时中心运行产生的时频数据、国际权度局（Bureau International des Poids et Mesures，BIPM）、国际地球自转服务机构（International Earth Rotation and Reference Systems Service，IERS）公布的时间频率相关数据等实现。该数据平台可为守时技术研究提供丰富的数据资源支撑，首先介绍时间频率数据平台的建设情况，随后利用数据平台汇交的本地守时系统比对、远距离链路比对数据开展守时技术研究，包括原子钟状态评估，主要分析原子钟异常跳变情况，研究跳变数据处理方法，针对不同类型守时钟，分析对比波动情况、稳定度等原子钟性能指标，此外基于 ARIMA 模型开展钟差预报研究。以上研究结果可为守时系统连续可靠运行提供重要参考。

关键词：时间频率；数据平台；守时技术；原子钟；守时系统

中图分类号：TH752　　**文献标识码**：A　　文章编号：1672-7673（2023）

随着我国科技不断进步，时间已经成为非常重要的研究课题[1]。高精度时间对于各行各业的影响巨大，包括卫星导航、计量等科技研究方面，交通运输、电力配送、社会生产等生活多方面[2-3]。对于时间的研究，在远距离比对方面，基于北斗系统的高精度时间比对技术研究前景广阔，在本地守时系统方面，开展时间保持技术的研究、原子钟物理性能研究、守时系统驾驭控制相关研究等意义非凡，这一切研究的基础依托于时间频率数据资源的汇交。

面对日益增长的时间频率数据资源服务需求，时间频率数据平台应运而生[4-5]。该数据平台的建立在时间频率数据规范化存储、数据共享、数据网络形成、用户基础服务、科研驱动等方面具有重要作用。数据平台采用多层应用结构组件化开发模式，数据分类定级，整个系统稳定性强，能够满足一定规模的应用需求，具有高效、安全、可扩展等特点。目前建成的数据服务平台汇集了本地守时系统、远程链路比对、国际服务机构发布相关数据，涵盖了原子钟权重、原子钟速率、原子钟频率漂移、CGGTTS、RINEX、公报数据等，在数据结构层面，较为全面地对数据进行分级分类，基本满足用户一站式应用需求。

用户可以依据时间频率数据平台对时频数据资源进行深度挖掘，开展各项基础研究，发挥其应有价值。本文主要从原子钟性能分析、原子钟异常跳变、钟差预报展开，这三个方面是守时系统稳定运转的重要基础研究参考信息，对于保障守时系统连续可靠运转具有重要意义。当然，时频数据的应用不拘于此，未来也将汇集更多相关数据资源，开展更多层次、多方位研究。

基金项目：中国科学院“西部之光”人才项目（XAB2021YN22）；中国科学院青年创新促进会（2020402）；国家天文科学数据中心

收稿日期：2022-08-11；　修订日期：2022-10-12

作者简介：章宇，男，助理研究员，主要研究时间保持技术与方法、数据处理方法. Email： yuzhang@ntsc.ac.cn

1 时间频率数据平台的建设

时间频率数据对天文学、地球动力学、物理学研究，以及信息传递、电力输配、深空探测、空间旅行、导航定位、武器实验、地震监测、计量测试等方面有重要的应用价值，因此建设专属时间频率数据平台意义深远[6]。

时间频率数据平台依据时间频率数据结构特征进行规范化存储，整个数据平台依据多层应用结构设计，数据平台在最核心也是最底层部分，不会直接暴露，可以有效提高数据库的安全性。

时间频率数据平台数据模块划分按时间频率数据分类定级标准完成。分类定级的标准包括数据的使用方法、数据开放计划、数据本身的特性、数据的更新频率、数据的体量大小等进行划定。目前平台的数据资源包括原子钟比对数据、原子钟状态参数数据、国际权度局发布的数据、公报数据等。

系统平台的整体扩展性较强，随着原子钟的增加、退出、守时系统模块的更新，访问的需求量增加，可按照新的需求通过在不同系统层面调度升级组件或扩展新加入的组件来升级系统，以适应新的需求及不断变化的数据库建设要求。

建成的数据平台具有安全性、完整性、可靠性、连续性和权威性，可以为时频科学研究与发展提供重要的基础技术支撑，同时也为各项时频技术和应用研究提供基本保障。图 1 为时间频率数据平台主页。

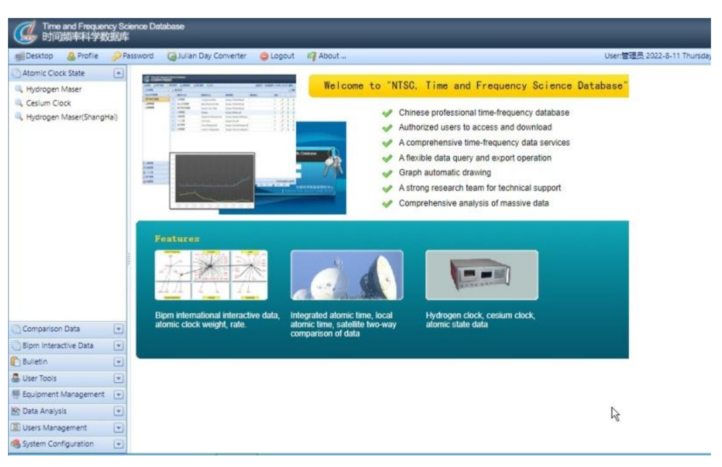


图1 时间频率数据平台

Fig.1 Time frequency data platform

2 基于数据平台相关数据分析研究

2.1 原子钟异常跳变及处理方法

基于时间频率数据平台本地守时系统测量数据、原子钟指标实时测量数据，可以进行原子钟异常跳变及相关处理方法研究。

原子钟跳变分为相位跳变和频率跳变[7]，其中相位跳变较为明显，对于整个守时系统的扰动相对强烈[8-10]，故本文主要讨论相位跳变。相位跳变的原因有很多，主要包括原子钟本身物理异常、所处环境温度、湿度变化、电磁场干扰和电源中断等。异常跳变对于守时系统的稳定运行有一定影响，例如原子钟跳变会使得连续稳定运行的守时系统产生波动，此外，如果该原子钟未被限制权重，则导致系统计算的驾驭量异常。

异常跳变检测是基于门限阈值，超出门限即判定为突变，检测门限值往往根据经验值设

定，检出异常值后，处理异常跳变的方法有最小二乘拟合法，即计算最小偏差平方和得到拟合多项式，原理为假定拟合多项式

$$y = a_0 + a_1 x + \cdots + a_m x^m \quad , \tag{1}$$

则拟合偏差平方和表示为

$$e^2 = \sum_{i=1}^{n} [y_i - (a_0 + a_1 x + \cdots + a_m x^m)]^2 \quad , \tag{2}$$

最小值即偏导数为 0 求出的极值，针对上式右边求偏导数并化简可得

$$\begin{vmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^m \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^m \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{vmatrix} \tag{3}$$

令

$$X = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^m \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^m \end{vmatrix} , \quad A = \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{vmatrix} , \quad Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{vmatrix} \quad , \tag{4}$$

则拟合值为

$$\hat{A} = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad . \tag{5}$$

从时频数据平台随机选择中国科学院国家授时中心一台铯原子钟 Cs3436，进行扣常数转纳秒，假定在儒略日 59370.253 处发生相位跳变，如图 2 。运用最小二乘拟合法对跳变进行修正，结果如图 3。由图 3 可知，该方法对于异常值跳变修正情况良好，证明算法有效。

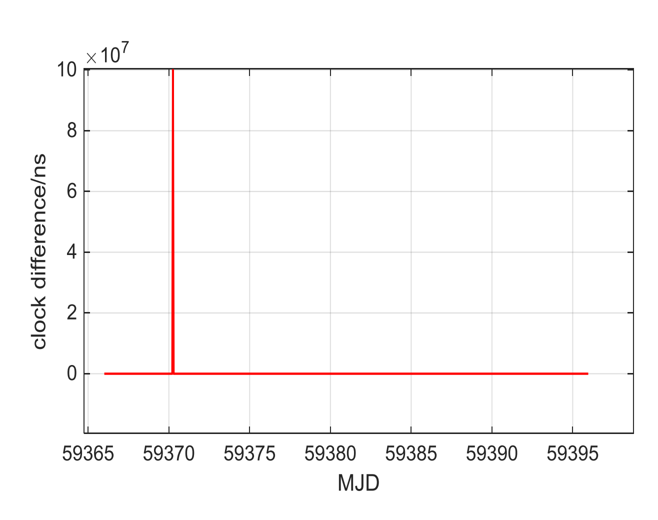


图2 Cs3436钟差波动情况

Fig.2 The clock difference fluctuation of Cs3436

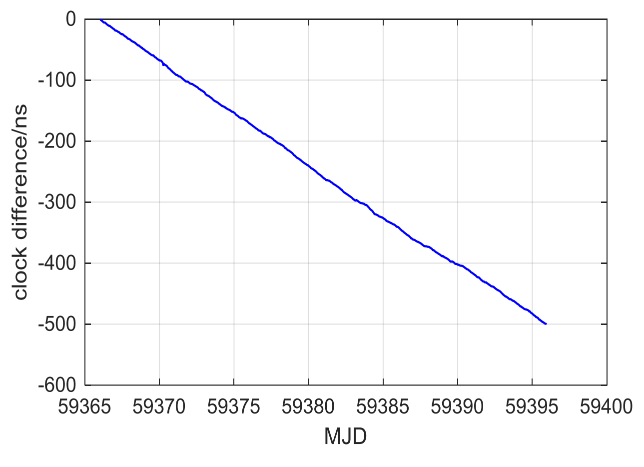


图3 原子钟异常跳变处理结果

Fig.3 Processing result of abnormal jump of atomic clock

2.2 守时型原子钟性能分析

利用时间频率数据平台公报数据、原子钟相位数据、速率数据、远距离链路比对数据等开展守时型原子钟的性能分析[11-13]。稳定度是评估原子钟的重要指标，艾伦（Allan）方差是时间领域常用的分析时间频率稳定度的测量方法，具有良好的置信度。艾伦方差计算公式为

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2\tau^2(M+1-2)}\sum_{i=1}^{N-2}(x_{i+2}-2x_{i+1}+x_i)^2 \tag{6}$$

，

其中，x_i 为第 i 个相位数据间隔；M 为连续测量的次数；τ 为采样间隔。从时间频率数据平台随机选择中国科学院国家授时中心 3 台铯钟和 3 台氢钟 2022 年 1 月份比对数据，相关波动情况如图 4，稳定度计算结果如图 5。

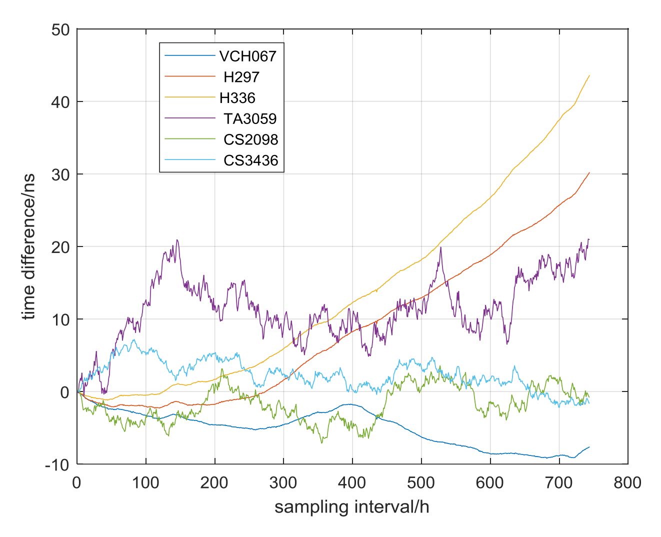


图4 氢原子钟和铯原子钟波动情况对比

Fig.4 Comparison of fluctuations of hydrogen maser and cesium atomic clock

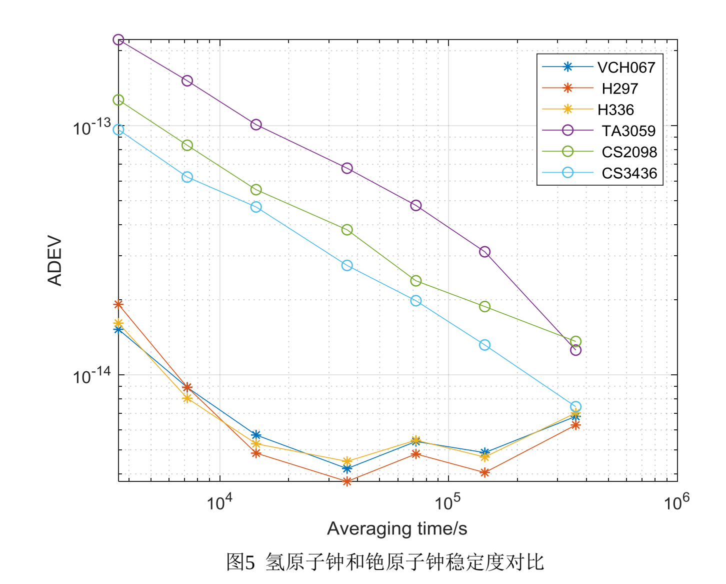


图5 氢原子钟和铯原子钟稳定度对比

Fig.5 Comparison of the stability of hydrogen maser and cesium atomic clock

图 4 数据处理的过程为选取一个月原子钟钟差数据进行速率及频率漂移预报，随后进行频率修正。由图 4 可以看出，铯原子钟钟差波动变化较为明显，氢原子钟钟差波动变化较小，但是长期具有趋势项。图 5 为利用艾伦方差计算 6 台钟稳定度对比，可以看出氢原子钟短期稳定度高于铯原子钟，但由于氢原子钟普遍频率漂移较大，长期稳定度变差。

2. 3 基于 ARIMA 模型的钟差预报

原子钟的钟差预报是守时系统动态控制参考量计算的基础[14]，同时也有原子钟异常检测的功能，当预报钟差与实际钟差相差大于一定范围，则判定为原子钟异常，因此钟差的预报具有重要意义[15-20]。由于原子钟钟差数据往往是非平稳序列，而 ARIMA 模型将非平稳数据经过差分得到平稳数据，建模简单，运算过程只依赖数据本身，故本文采用 ARIMA 模型进行钟差预报，ARIMA 模型由 AR 模型及 MA 模型两部分构成，AR 模型即自回归模型，可以表示为

$$x_t = h_1 x_{t-1} + h_2 x_{t-2} + \cdots + h_p x_{p-2} + u_t \quad , \tag{7}$$

其中，p 为自回归模型的阶数；h_i 为自回归系数。通常认为 AR 模型中，u_t 是 q 阶移动平均。

MA 模型表示为

$$u_t = \varepsilon_t + \varphi_1 \varepsilon_{t-1} + \varphi_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \varphi_q \varepsilon_{t-q} \quad , \tag{8}$$

其中，ε_t 为白噪声。ARIMA 模型一般表达式为

$$x_t = h_1 x_{t-1} + h_2 x_{t-2} + \cdots + h_p x_{t-p} + \varepsilon_t + \varphi_1 \varepsilon_{t-1} + \varphi_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \varphi_q \varepsilon_{t-q} \quad . \tag{9}$$

ARIMA 模型的核心是通过历史数据预测当前数据，对于非平稳数据，进行差分获得平稳数据作为模型输入。模型的自回归阶数 p，滑动平均阶数 q 以及差分阶数 d 需要确定，其中差分阶数 d 的确定是数据经过差分成为平稳序列的差分次数，自回归阶数 p、滑动平均阶数 q 可以通过求取自相关函数和偏自相关函数获得，也可以基于 AIC 准则、BIC 准则获得。

基于时频数据平台随机选择中国科学院国家授时中心一台氢钟 VCH067 一个月的数据作为研究基础，运用 ARIMA 模型进行预报，钟差预报的结果如图 6，钟差预报与实际钟差残差如图 7，钟差预报的 RMS 如图 8。

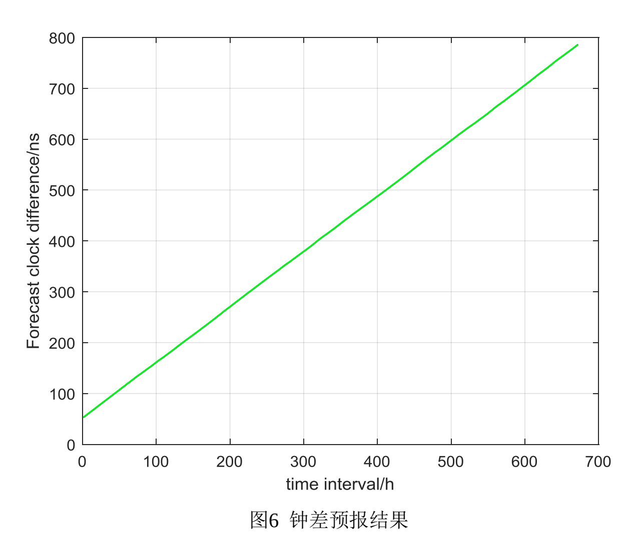


图6 钟差预报结果

Fig.6 Clock difference forecast result

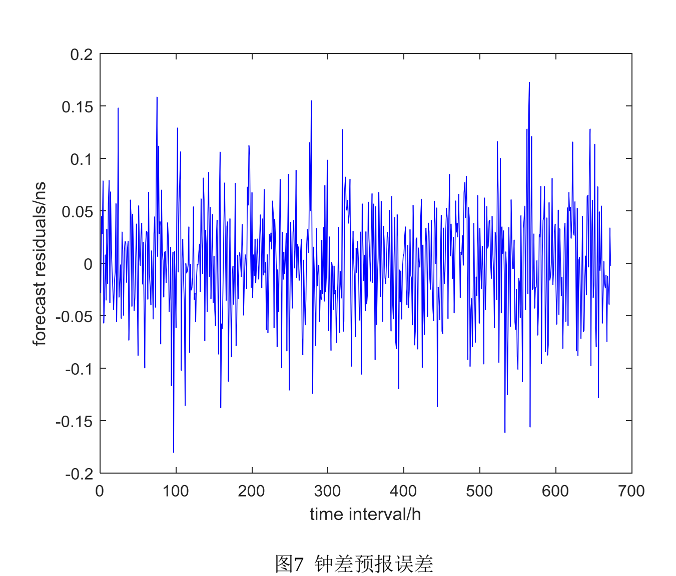


图7 钟差预报误差

Fig.7 The prediction error of clock difference forecast

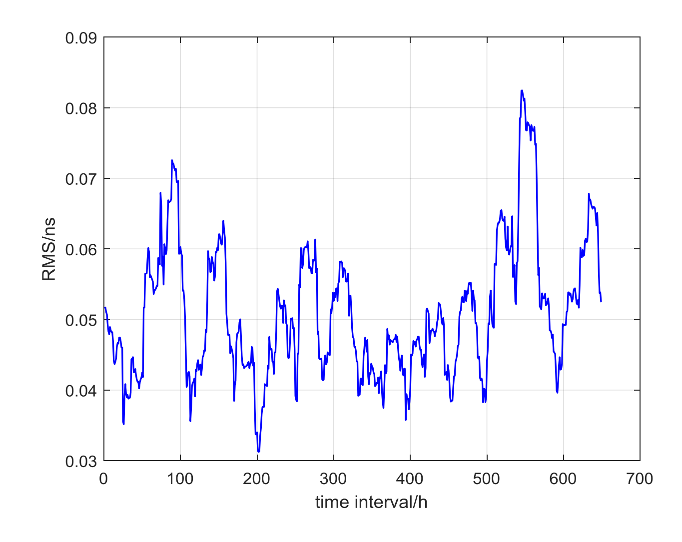


图8 钟差预报的RMS

Fig.8 The prediction RMSE of clock difference forecast

由图 6 和图 7 可以看出，基于 ARIMA 模型钟差预报结果与实际钟差数据吻合度良好，趋势一致。预报钟差与实际钟差的残差保持在±0.2ns 以内。图 8 是以天为滑动区间长度计算得到的预报钟差的均方根，均方根基本保持在 0.1ns 以内，说明基于 ARIMA 模型进行的钟差预报效果良好。该结果可为守时系统的钟差预报、卫星钟差预报提供一定参考。

3 结语

本文首先介绍时频数据平台建设背景及具体部署情况，随后针对数据平台本地原子时比对数据、国际公报等数据开展基础研究，相关研究包括原子钟的跳变分析及处理方法、守时型原子钟波动情况、稳定度性能分析，以及基于 ARIMA 模型的钟差预报研究。三种基础研究可为守时系统稳定可靠、连续运转提供参考。未来随着时间频率数据平台建设的不断完善、数据集种类的不断丰富、优化，其应用空间必将更加广阔。

参考文献

[1] 董绍武.守时中的若干重要技术问题研究[D].北京:中国科学院研究生院（国家授时中心）, 2007.

DONG S W. Study on Several Important TechnicalIssues in Time-keeping [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2007.

[2] 王玲玲,苟伟.时频系统故障预测[J].天文研究与技术,2022,19(04):386-395.

WANG L L,GOU W.Timing System Failure Prediction[J].Astronomical Research & Technology,2022,19(04):386-395.

[3] 潘志兵,谢勇辉,帅涛,陈鹏飞,裴雨贤,潘晓燕,赵阳,林传富.星载氢原子钟用多段线圈式 C 场的仿真及应用[J].天文研究与技术,2020,17(03):341-348.

PAN Z B,XIE Y T, SHUAI T, et al.Simulation and Application of Multi－section Coil for C Field Used in Space Passive Hydrogen Maser[J].Astronomical Research & Technology,2020,17(03):341-348.

[4] 李跃鹏,及俊川,李新,史广军.一种基于关系型数据库的工作流管理系统[J].科研信息化技术与应用,2016,7(02):81-89.

LI Y P, JI J C, LI X, SHI G J. A Workflow Management System Based on Relational Database [J]. Research Information Technology and Application, 2016,7(02):81-89.

[5] 桂文庄. 科学数据库和科学研究信息化——关于中国科学院科学数据库历史经验的若干思考[J]. 科研信息化技术与应用,2012,3(02):3-9.

GUI W Z. Scientific Database and Scientific Scientific Database vs. e-Science—Some Thoughts on the Historical Experiences of Scientific Databases of Chinese Academy of Sciences [J]. Research Information Technology and Application, 2012,3(02):3-9.

[6] 凌静. 网络时间分析及应用研究[D].北京邮电大学,2020.

LING J. Network Time Analysis and Application Research [D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.

[7] 秦晓伟,孙云峰,杜二旺,王国永. 星载原子钟频率跳变检测方法仿真分析研究[J]. 时间频率学报,2020,43(02):113-120.

QIN X W, SUN Y F, DU E W, WANG G Y. The research on simulation analysis of on-boardatomic clock frequency jump detection method [J]. Journal of Time and Frequency, 2020,43(02):113-120.

[8] 白杉杉,董绍武,赵书红,张继海. 主动型氢原子钟性能监测及评估方法研究[J]. 天文学报,2018,59(06):58-68.

BAI S S, DONG S W, ZHAO S H, ZHANG J H. Research on the Method of Performance Monitoring and Evaluation for Active Hydrogen Maser[J]. Chinese Journal of Astronomy, 2018,59(06):58-68.

[9] 伍贻威. 基于钟差预测的铯原子钟频率异常检测算法及性能分析[J]. 测绘学报,2021,50(01):52-60.

WU Y W.Acesium atomic clock frequency anomaly detection algorithm based on clock Prediction and its performance

analyses[J].Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica, 2021,50(01):52-60.
[10] 牛飞,韩春好,张义生,常守峰.导航卫星星载原子钟异常监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(05):585-588.
NIU F, HAN C H, ZHANG Y S, CHANG S F. Analysis and Detection on Atomic Clock Anomaly of Navigation Satellites [J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(05): 585-588.
[11] 冯遂亮.原子钟数据预处理与钟性能分析方法研究[D].解放军信息工程大学,2009.
FENG S L. Study on the Methods of Data Preprocessing and Performance Analysis for Atomic Clocks [D]. PLA Information Engineering University, 2009.
[12] 黄观文.GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D].长安大学,2012.
HUANG G W. Research on Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of GNSS Satellite Clock [D].Chang'an University, 2012.
[13] 郭海荣.导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D].解放军信息工程大学,2006.
GUO H R. Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellites [D].PLA Information Engineering University, 2006.
[14] 章宇,董绍武,宋会杰,袁海波,赵书红. 关于氢原子钟的钟差预报研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(11):90-97.
ZHANG Y,DONG S W,SONG H J,YUAN H B,ZHAO S H . Research on clock difference prediction of hydrogen maser[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(11):90-97.
[15] 王旭,柴洪洲,石明琛,种洋. 卫星钟差预报模型的分析与比较[J]. 测绘科学技术学报,2021,38(04):350-354.
WANG X,CHAI H Z,SHI M C,ZHONG Y. Analysis and Comparison of Satellite Clock Bias Prediction Model[J].Journal of Geomatics Science and Technology,2021,38(04):350-354.
[16] 姜诗奇,李博峰. ARIMA 模型在卫星钟差短期预报中的应用[J]. 导航定位学报,2019,7(04):118-124.
JIANG S Q, LI B F.Application of ARIMA model in short-term satellite clock error prediction[J].Journal of Navigation and Positioning,2019,7(4): 118-124.
[17] 王宇谱. GNSS 星载原子钟性能分析与卫星钟差建模预报研究[D].解放军信息工程大学,2017.
WANG Y P. Research on Modeling and Prediction of the Satellite Clock Bias and Performan Evaluation of GNSS Satellite Clocks [D].PLA Information Engineering University,2017.
[18] 王宇谱,吕志平,王宁,李林阳,宫晓春. 顾及卫星钟随机特性的抗差最小二乘配置钟差预报算法[J]. 测绘学报,2016,45(06):646-655.
WANG Y P, LU Z P, WANG N,et al. Prediction of Navigation Satellite Clock Bias Considering Clocks Stochastic Variation Behavior with Robust Least Square Collocation[J].Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica,2016,45(6):646-655.
[19] 王宇谱,吕志平,孙大双,王宁. 一种改进钟差二次多项式模型的导航卫星钟差预报方法[J].天文学报,2016,57(01):78-90.
WANG Y P,et al. A New Navigation Satellite Clock Bias Prediction Method Based on Modified Clock-bias Quadratic Polynomial Model[J]. Chinese Journal of Astronomy,2016,57(01):78-90.
[20] 王宇谱. 导航卫星原子钟钟差预报理论与方法研究[D].解放军信息工程大学,2014.
WANG Y P. Research on the Prediction Theories and Methods of Atomic Clock Bias for Navigation Satellites[D]. PLA Information Engineering University,2014.

Data analysis and research based on time-frequency data platform

ZHANG Yu [1, 2*] ,QU Lili[1, 2] ,DONG Shaowu [1,2, 4], ZHANG Jihai[1, 2],BAI Shanshan[1, 2],
WANG Yiheng [1,2,3]

(1. National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences, Xi’an 710600, China;

2. Key Lab of Time-frequency Standard of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Astronomy and Space Science of University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Time-frequency data resources are important national information resources. The design of the time-frequency data platform relies on the time-frequency data generated by the daily operation of the National Time Service Center, the bulletin issued by Bureau International Des Poids et Mesures (BIPM) and International Earth Rotation and Reference Systems Service(IERS).The data platform can provide abundant data resources for the research of time-keeping technology. This paper first introduces the construction of the time-frequency data platform, and then uses the local time-keeping system comparison and long-distance link comparison data collected by the data platform to carry out time-keeping technology research, including the evaluation of the state of the atomic clock, and the analysis of the abnormal jump of the atomic clock. For different types of clock keeping, analyze and compare the performance indicators of atomic clocks such as fluctuation and stability, and conduct clock error prediction research based on the ARIMA model. The research contents of those different aspects can provide important reference for the continuous and reliable operation of the time-keeping system.

Key words: time frequency; data platform; time-keeping technology; atomic clock; time-keeping system